

氏 名	木船 尚子
学 位 の 種 類	博士 (理学)
学 位 記 番 号	博甲第 9 6 4 号
学位授与の日付	平成 20 年 3 月 22 日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第 4 条第 1 項)
学位授与の題目	Flavor Symmetry and Flavor Changing Neutral Higgs Bosons (フレーバー対称性とフレーバーを変える中性ヒッグス粒子)
論文審査委員 (主査)	久保 治輔 (自然科学研究科・教授)
論文審査委員 (副査)	鈴木 恒雄 (総合メディア基盤センター・教授), 青木 健一 (自然科学研究科・教授), 末松 大二郎 (自然科学研究科・教授), 寺尾 治彦 (自然科学研究科・准教授)

概要

Higgs undiscovered is one of the problem possessed by the standard model(SM), at the same time the SM is supposed to be extend. Then we investigate flavor-changing neutral current (FCNC) processes in the model based on the discrete Q_6 family symmetry, especially those mediated by heavy flavor-changing neutral Higgs bosons. Because of the family symmetry the number of the independent Yukawa couplings is smaller than that of the observed quantities such as the Cabibbo-Kobayashi-Maskawa matrix and the quark masses, so that the FCNCs can be parametrized only by the mixing angles and masses of the Higgs fields. We focus our attention on the mass differences of the neutral K , D and B mesons. Consequently we found all the constraints including that from the ratio $\Delta M_{B_s}/\Delta M_{B_d}$ can be satisfied, if the heavy Higgs bosons are heavier than ~ 1.5 TeV. If the constraint from ΔM_K is slightly relaxed, the heavy Higgs bosons can be as light as ~ 0.4 TeV, which is within the accessible range of LHC.

要旨

素粒子論とは現在最小と考えられている粒子 (クォーク、レプトン、ゲージ粒子、ヒッグス粒子) のつくる世界を記述する学問である。そしてそれらの粒子は $SU(2) \times U(1)$ ゲージ群で書かれる電弱理論と $SU(3)$ の量子色力学で書かれる標準理論で記述されると考えられている。標準模型は、 $SU(2) \times U(1)$ 理論から荷電ゲージ粒子や中性ゲージ粒子の存在を予言し実験で検証されるなど、さまざまな実験結果と一致することが確かめられていることから現在では素粒子における最高の理論として考えられている。しかしなぜクォークレプトンは三種類なのか、その質量は現在観測されているような値になるのか等の問いに答えることができず、更なる拡張が求められている。また標準模型においてヒッグス粒子は真空期待値を持つことで $SU(2) \times U(1)$ 対称性を破り粒子に質量を与えるという重要な役割を果たすが現在未発見であり、ヒッグス粒子の発見、その質量や性質を調べることは新たな理論の確立において重要である。

標準理論が抱える問題の一つに、ヒッグス粒子の質量に対する量子補正が不自然な計算になるという「ゲージ階層性の問題」がある。この問題を解決する理論として有力なのが超対称性理論である。しかし、素粒子の世界では超対称性は破れている。(超対称性は統計の違う同じ質量を持つ粒子の対の存在を予言するが、電子の同じ質量を持つボゾンのパートナーは存在していない。) Higgs の self energy の 2 次発散を抹殺しながら超対称性を破ることができれば、実験的事実と矛盾しないで標準理論を超対称化することができ、高エネルギーの理論に拡張することができるはずである。これは、超対称性を soft に破ることにより可能になることが知られている。しかし、それだけでは 100 以上の soft に破る項が導入でてしまい、たくさんのパラメーターが出てしまう。また超対称性を soft に破る項には CP 対称性を破る位相、フレーバーを変える中性電流 Flavor changing neutral current (FCNC) を誘導することができる。しかし、これらの 100 以上の新しいパラメータを精密に調整 (fine tuning) しないと実験と矛盾することが知れていて、標準理論を

超対称化すると、なぜそのように多くの独立なパラメータの導入が可能で、しかもなぜそれらが fine tuning されていなければならないのかを説明しなければならない。これが、SUSY フレーバー問題で、超対称が素粒子の現象論に導入された 1980 年代以来から知られている問題である。

本研究では物質粒子の質量、世代間混合現象、SUSY フレーバー問題を Q_6 群に基づく世代対称性を課すことで説明する。Higgs 粒子とすべての物質の世代に Q_6 群の "doublet+singlet" の構造を持つことを要求したモデルである。この模型の一つの特徴は、CP 対称性が自発的に破れているということである。このモデルの枠組みで、 Q_6 フレーバー対称性のもとに CP 対称性が自発的に破れると、超対称性を soft に破る項による CP 対称性を破る位相がなくなることが示された。また Q_6 対称性のために soft に SUSY を破る項に制限が加わり SUSY FCNC が抑えられている。

また、このモデルにおける実験値を満たすような Yukawa coupling は非常に制限されているので、Yukawa coupling と質量を対角化するユニタリー行列はユニタリー行列の位相を除きそれぞれの値を具体的に与えることができる。更に、6 個のクォーク質量と質量対角化行列で書ける小林・益川クォーク混合行列 V_{CKM} を決める 4 個の独立なパラメータ、あわせて 10 個のパラメータが 9 個のパラメータで記述されているので、残りの一つのパラメータが予言可能になっている。

しかし、このモデルでは SSB term による FCNC が抑えられていても新たな Higgs 粒子を導入した (MSSM のアップセクターに 3 つ、ダウンセクターに 3 つの Higgs 粒子を用意し各セクターの Higgs 粒子に Q_6 群の "doublet+singlet" を持つように要請した) ために Higgs 粒子による世代を変える中性カレントを引き起こしてしまう。これは Tree diagram でかける大きな値をとる可能性があるものである。この現象は中性中間子質量差 ΔM_B , ΔM_D , ΔM_K を計測する実験から強く制限されている。 Q_6 モデルでの ΔM_B , ΔM_D , ΔM_K の寄与は Yukawa coupling とユニタリー行列が具体的に与えられているので、FCNC の起こる現象を Higgs 粒子の質量とその真空期待値の比のみの関数で表すことができる (ユニタリー行列の位相はここでは打ち消しあいでない)。 $\Delta M_K, \Delta M_D, \Delta M_{B_s}, \Delta M_{B_d}$ の計測は非常に精度よく行われており、実際の間接子はグルーオンが飛び交い崩壊はハドロンのエネルギースケール $\mathcal{O}(M_{K,B,D})$ で起こるものなので、解析の際は QCD の寄与を含めた $\Delta M_{B_{d,s}}, \Delta M_D$ の計算を行い実験と比較した。K 中間子に関してはこの寄与の導出において他の誤差の大きい値を使うため QCD の寄与を含めず計算した。また $\Delta M_{B_s}, \Delta M_{B_d}$ は SM の寄与が精度よく計算されているので考慮に入れた。この二つは SM の実験値と異なる範囲のみに EXTRA の寄与は許されるとして解析した。 $\Delta M_K, \Delta M_{B_s}, \Delta M_{B_d}$ が実験と満たされる範囲は同じパラメータ空間で書くことができるので、この 3 つとさらに $\Delta M_{B_s}/\Delta M_{B_d}$ が実験値から 5 % の誤差に収まるという条件を課すと、すべてを満たすような Higgs 粒子の質量は 1.5 TeV 以上でなければならないことがわかった。しかし ΔM_K に関しては誤差が大きいため制限を $\Delta M_K^{\text{EXTRA}} < 2\Delta M_K^{\text{exp}}$ とゆるくすると、Higgs 粒子の質量の下限が 0.4 TeV 程度となった。これは LHC 実験で観測されるエネルギー範囲内である。

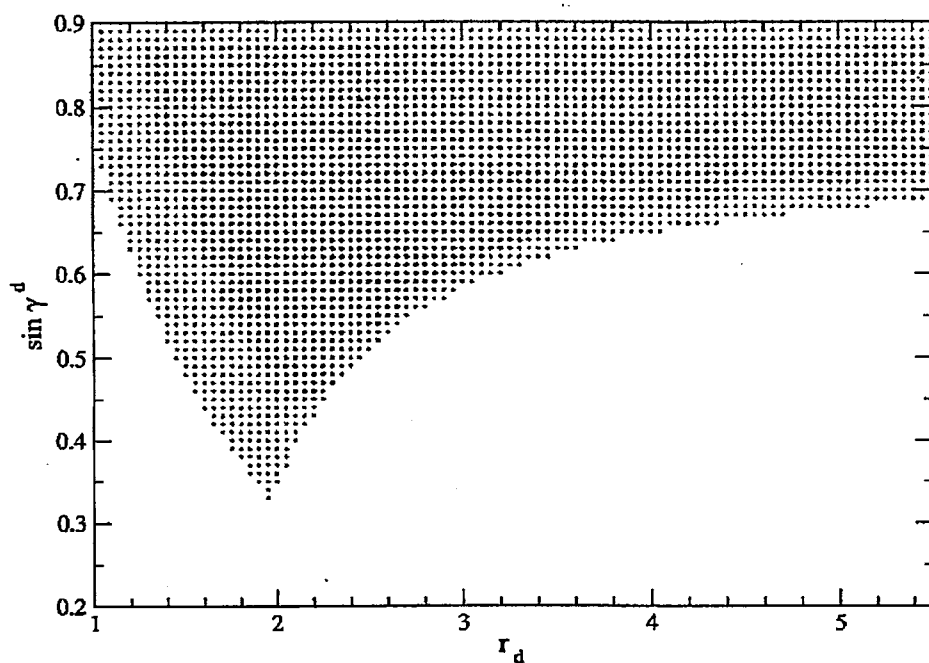


図 1: 実験値 $\Delta M_K, \Delta M_{B_{s,d}}$ からくる条件を満たす $r_d - \sin \gamma^d$ 図。色の違いは $M_H^d = 1.5$ (red (dark grey)), 2 (green (grey)) TeV によるもの。

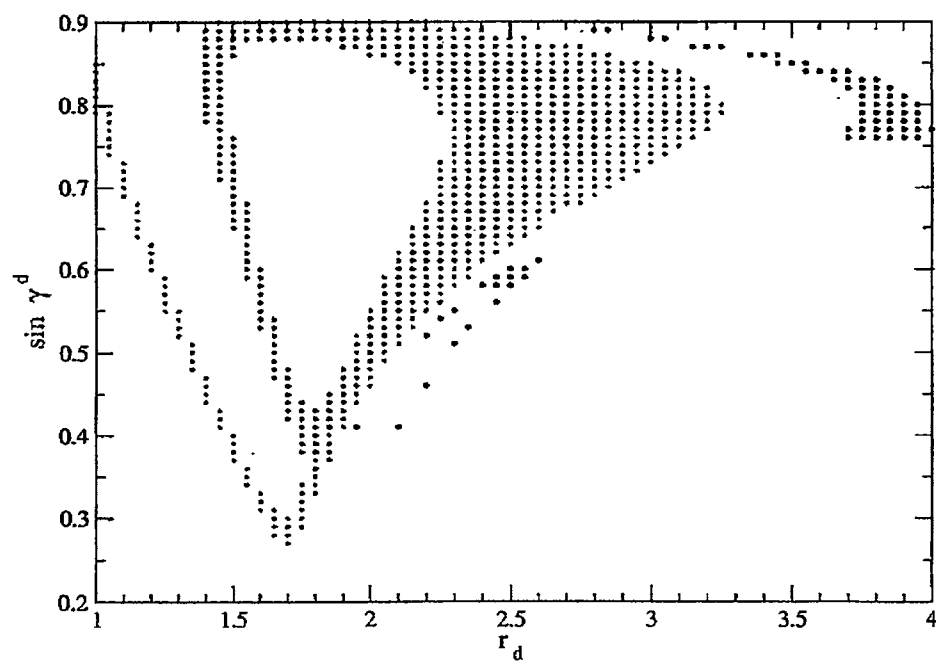


図 2: $\Delta M_{B_{s,d}}, \Delta M_{B_s}/\Delta M_{B_d}$ からくる条件を満たす $r_d - \sin \gamma^d$ 図。色の違いは $\cos \beta M_H^d = 0.50$ (black), 1.5 (red (dark grey)), 2 (green (grey)) TeV によるもの。

学位論文審査結果の要旨

木船尚子さんの学位論文について、上記5名の審査委員による査読の後、平成20年1月29日に口頭発表が行われた。同日に審査会を開き、以下の理由で彼女の論文は博士（理学）の学位に値すると判定した。

素粒子の標準理論で素粒子に質量を与える部分が湯川セクターである。しかし、このセクターの構造を決める原理が存在していない。最近、フレーバー対称性がこの原理を決める一つの手がかりになっているという指摘がある。木船さんは、有限群 Q_6 に基づくフレーバー対称性を持つ、標準理論が拡張された超対称モデルについて研究を行った。特に、粒子の種類が中性ヒッグス粒子の媒介によって変わる Flavor Changing Neutral Current (FCNC) 反応に注目して調査を行なった。標準理論の枠内では、FCNC 反応は非常に小さく、FCNC 反応の解析は標準理論が拡張されるモデルを考察する際に欠かすことができない。このような FCNC は、中性 B 中間子の質量の差に寄与し、標準理論の予言を変え、実験結果と矛盾する可能性がある。木船さんは、このモデルの枠組みで中性 B 中間子の質量の差を、QCD の量子補正も含めて計算した。その結果、FCNC を起こす中性のヒッグス粒子の質量の下限が 500GeV であり、大型加速器 LHC で観測可能な範囲に入っていることが分かった。これら結果は、標準理論を超える素粒子論の発展に大きな影響を与えるものであると期待できる。以上の点から委員会は本論文が学位論文として値すると結論した。